昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*, December 2009, 52(12): 1290 - 1297 ISSN 0454-6296

植物气味化合物与斜纹夜蛾性信息素的协同作用

沈幼莲[1], 高 扬[2], 杜永均[2,*]
(1. 慈溪市森林病虫防治检疫站, 浙江慈溪 315300; 2. 温州医学院健康与环境生态研究所, 浙江温州 325035)

摘要: 为提高现有性信息素对雄蛾的引诱活性, 本研究通过大量的田间试验探索植物气味化合物与斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 性信息素(顺9, 反11-十四碳二烯乙酸酯: 顺9, 反12-十四碳二烯乙酸酯 = 10∶1)的协同作用机制。从斜纹夜蛾寄主植物和花的气味化合物中, 选择9种有代表性的化合物, 并以一定剂量分别加入到斜纹夜蛾性信息素诱芯中, 在田间测试对雄蛾的引诱活性。结果表明: 在测试的9种植源性化合物中, 发现一定剂量(每个诱芯加入0.4 mg)的苯乙醛(PAA), 具有显著提高斜纹夜蛾性信息素的引诱作用, 而高剂量的苯乙醛则强烈抑制性信息素的引诱活性; 此外, 其他各种浓度的测试化合物或混合物对性信息素则没有统计上显著的增效作用。不同剂量的苯乙醛单个化合物及各种植物气味化合物组成的混合物对斜纹夜蛾也有微弱的引诱作用。苯乙醛必须要与性信息素的完整组分(以10∶1比例混合的顺9, 反11-十四碳二烯乙酸酯和顺9反, 12-十四碳二烯乙酸酯)混合才能起作用, 缺少顺9, 反12-十四碳二烯乙酸酯则没有引诱活性。本研究证明, 苯乙醛作为理想的性信息素诱芯增效剂, 可应用于建立更理想的斜纹夜蛾性信息素诱杀技术, 对性诱害虫防治和测报具有应用价值。

关键词: 斜纹夜蛾; 性信息素; 植物气味化合物; 协同作用; 群集诱捕
中图分类号: Q968 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2009)12-1290-08

The synergism of plant volatile compounds and sex pheromones of the tobacco cutworm moth, *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae)

SHEN You-Lian[1], GAO Yang[2], DU Yong-Jun[2,*] (1. Cixi Forest Pest Control and Quarantine Station, Cixi, Zhejiang 315300, China; 2. Institute of Health and Environmental Ecology, Wenzhou Medical College, Wenzhou, Zhejiang 325035, China;)

Abstract: A large number of field trials were carried out to explore the synergistic effect of plant volatile compounds derived from host plants and flowers and sex pheromones, *viz.* (9*Z*, 11*E*)-tetradecadienyl acetate and (9*Z*,12*E*)-tetradecadienyl acetate 10∶1, of the tobacco cutworm moth, *Spodoptera litura* (Lepidoptera, Noctuidae), and eventually to improve the attractiveness of sex pheromone lures to male moths. Nine compounds selected from the headspace volatiles of host plants and floral odors were individually added into pheromone lures and tested in the fields for their attractiveness to the male moths. The results indicated that only phenyl acetaldehyde significantly increased the attractiveness of the pheromone at certain dosage (0.4 mg per lure) to male moths. High dosage of phenyl acetaldehyde dramatically inhibited the responses of pheromone lures. Other compounds in single or mixture tested in our experiments showed no significant synergistic effect with pheromones at the dosages tested. The lures contained only phenyl acetaldehyde or its mixture with some compounds attracted the male moth weakly. However, only the complete blend of sex pheromones showed the synergistic effect with plant volatiles. Missing minor sex pheromone components resulted in no attractiveness to male moths. These results suggest that the synergism of phenyl acetaldehyde with sex pheromone can be used to upgrade the efficiency of *S. litura* pest control and monitoring by sex pheromone.

Key words: *Spodoptera litura*; sex pheromone; plant volatile compounds; synergism; mass trapping

斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*(鳞翅目, 夜蛾科)为我国长江以南蔬菜、烟草、棉花、茶叶、葡萄等农业和林特作物的重要害虫, 近几年更是有扩散至长江以北如河南、山东等省的趋势, 往往成群迁移为害农作

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(C110407).
作者简介: 沈幼莲, 女, 1966年3月生, 浙江慈溪人, 学士, 长期从事农林有害生物监测、预警和防治, E-mail: shenylemail@126.com
* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: dyj@wzmc.net
收稿日期 Received: 2009-06-24; 接受日期 Accepted: 2009-10-27

物，繁殖力强，且栖息地隐蔽，对农药抗性强，药剂防治非常困难，已到了无药可用的地步。为此，盲目过度施用化学农药，进而严重威胁农产品安全和出口，以及破坏农田生态系统，特别是有益生物。

近几年，我们大面积推广化学信息素，特别是性信息素，群集诱杀防治和测报农林害虫，效果显著，具有良好的生态和社会效益。而且，由于诱捕效果直观，合成性信息素的群集诱杀雄虫在害虫防治和测报中的应用普遍得到农民和农技人员的接受。然而在实际应用中，发现如下问题：(1)许多害虫的雄成虫可以多次交配，例如，斜纹夜蛾可以平均交配6.3 次，最多 13 次(欧阳盛芝和朱耀沂，1990)。同时，由于存在自然雌蛾种群的竞争性，如果群集诱杀雄虫的数量不足，就不能起到显著的防治效果。在测报中，也不能准确地反映下一代的种群密度；(2)一般性信息素的合成成本相对较高。开发成本较低的植源性协同增效剂是解决这个问题的方法之一，但如何优化混合物并达到最大的增效作用则是一个难题；(3)一些植食性昆虫(如果实蝇、松墨天牛、菜粉蝶、稻飞虱、粉虱等)没有明显的性信息素引诱其与异性交配，但其寄主植物在寄主选择、产卵等行为调控中起重要作用。显然，如果能从植物气味物质中开发诱捕雌虫的引诱物是最理想的，或发现可以提高现有性信息素的增效剂，都将显著提高现有化学信息素的利用效率和应用前景。

本研究从斜纹夜蛾寄主植物和花的气味化合物中，选择一些有代表性的化合物，结合田间行为生测，筛选出对斜纹夜蛾性信息素有协同作用的组分，从而进一步提高现有性诱剂的引诱活性，从而使防治和测报更高效。

1　材料和方法

1.1　试验材料及其来源

试验中使用的化合物见表 1。斜纹夜蛾为杂食性，所以我们选择了不同类型的寄主植物气味化合物。顺-3-己烯乙酸酯是植物中常见的绿叶气味。苯甲醇、2-羟基苯甲醛、水杨酸甲酯、苯甲醛和苯乙醛是花、玉米丝和杨树叶等植物气味中最常见的化合物。柏木脑和柏木烯虽然是香柏的主要成分，但我们在豇豆的花气味中也鉴定到这两种组分。罗勒烯是许多植物和水果中常见的挥发性萜品类化合物。

表 1　试验中使用的化合物名称、结构、来源和纯度

Table 1 The chemical structure, source and purity of compounds used in the experiments

化合物 Compounds	结构 Structure	来源 Source	纯度 Purity (%)
顺 9，反 11-十四碳二烯乙酸酯 (9*Z*,11*E*)-tetradecadienyl acetate		实验室合成 Synthesized in the laboratory	95
顺 9，反 12-十四碳二烯乙酸酯 (9*Z*,12*E*)-tetradecadienyl acetate		实验室合成 Synthesized in the laboratory	99
顺-3-己烯-乙酸酯 3 *Z*-hexen-1-ol acetate		Sigma Aldrich 公司 Sigma-Aldrich Co., Ltd.	98
苯甲醛 Benzaldehyde		Sigma Aldrich 公司 Sigma-Aldrich Co., Ltd.	98
苯乙醛 Phenylacetaldehyde		Sigma Aldrich 公司 Sigma-Aldrich Co., Ltd.	98
柏木脑 Cedrol		福建漳州香精香料公司 Zhangzhou Flavors & Fragrances, Fujian	97
柏木烯 Cedrene		福建漳州香精香料公司 Zhangzhou Flavors & Fragrances, Fujian	97
罗勒烯 Ocimene		福建漳州香精香料公司 Zhangzhou Flavors & Fragrances, Fujian	97
苯甲醇 Benzyl alcohol		天津市大茂化学试剂厂 DamaoChem, Tianjin	98
2-羟基苯甲醛 2-Hydroxybenzaldehyde		国药集团化学试剂厂 Sinopharm Chemical Reagent Co.,Ltd	98
水杨酸甲酯 Methyl salicylate		天津市博迪化学试剂厂 Bodi Chemical, Tianjin	99.5

化合物释放器(诱芯)：性信息素化合物及其与植物气味化合物的混合物所用释放器为 PVC 毛细管，外形参考尺寸：长度(80 ±5) mm；外径(1.1 ±0.2)mm；内径(0.8 ±0.1) mm。而单一植源化合物试验的所用释放器为天然脱硫橡胶(宁波纽康生物技术有限公司生产)。天然橡胶外形参考尺寸：长度(14 ±1) mm；实心部分直径(5 ±1) mm,长(5 ±1) mm。溶剂为重蒸分析纯正己烷。

性信息素诱芯：为宁波纽康生物技术有限公司标准诱芯，由顺9，反11-十四碳二烯乙酸酯和顺9，反12-十四碳二烯乙酸酯以 10∶1 浓度比例组成，每个诱芯的性信息素剂量为 1.1 mg，并加入适量的 BHT 抗氧化剂。

诱捕器：采用塑料注塑成形的干式夜蛾类诱捕器，为宁波纽康生物技术有限公司生产。

1.2 田间诱捕试验

昼夜诱捕试验在北仑区城郊的蔬菜地(主要作物番茄、青菜、大白菜、毛豆、玉米等)进行，所使用的是性信息素毛细管标准诱芯。

增效剂试验于 2008 年 6 月至 2009 年 6 月在浙江省宁波市梅山岛的万亩西兰花蔬菜基地进行。由于化合物种类多，加上每种化合物需要测试不同浓度及 6 个重复，为此，试验分两组进行。第 1 组试验在 2008 年 9 月 9 至 10 月 27 日进行，试验化合物包括顺 3-己烯乙酸酯，苯甲醛和苯乙醛，每个斜纹夜蛾性信息素诱芯中所加入的植物气味化合物的剂量分别为 0.4，1 和 2 mg。第 2 组试验在 2008 年 10 月 27 至 11 月 8 日进行，试验化合物包括柏木烯、罗勒烯、苯甲醇、2-羟基苯甲醛和水杨酸甲酯，除苯乙醛为 0.1 mg 外，每个诱芯所加入的植物气味化合物的剂量为 0.4 mg。

单纯植物气味化合物的诱捕试验采用脱硫天然橡胶诱芯，混合物有如下化合物组成：顺-3-己烯乙酸酯(每诱芯 0.4 mg)，苯甲醛(每诱芯 0.1 mg)，苯乙醛(每诱芯 0.4 mg)，苯甲醇(每诱芯 0.1 mg)，2-羟基苯甲醛(每诱芯 0.1 mg)和水杨酸甲酯(每诱芯 0.1 mg)。在试验中利用斜纹夜蛾的 PVC 毛细管性信息素标准诱芯和毛细管性信息素标准诱芯加入 0.4 mg 的 PAA 作为对照。

诱捕器的进虫口离地面 1.5 m，诱捕器之间相距 30 m 左右。诱捕试验持续 10 d，每 5 d 记录一次，每个处理设置 6 个诱捕器(即在同一次试验中重复 6 次)。设置时，每个重复的不同处理诱捕器为一个小区，总计 6 个小区。

1.3 数据统计与分析

实验数据采用浙江大学唐启义教授研发的 DPS 数据处理系统 8.01 进行分析，平均数间多重比较采用 Duncan 氏新复极差法进行分析。

2 结果

2.1 斜纹夜蛾性信息素对雄蛾的引诱作用及其昼夜变化

在田间，采用 PVC 材料制作的合成斜纹夜蛾毛细管诱芯的性信息素组份顺9，反11-十四碳二烯乙酸酯和顺9，反12-十四碳二烯乙酸酯以 10∶1 配制时强烈引诱其雄蛾，在田间夜晚观测、摄像发现雄蛾以 zig-zag 曲线飞行至诱捕器，然后迫切地寻找进口进入诱捕器。在 2008 年 9 月 1 日的田间观测数据表明，从傍晚至凌晨之间都有不同量的雄蛾进入诱捕器，但以傍晚时段诱蛾量为最高，在凌晨 2 –3 时也有一微弱的诱蛾高峰(图 1)，这与梨小食心虫的傍晚和稻纵卷叶螟的凌晨 3 –4 时的单一诱蛾高峰有差异(杜永均，未发表资料)。

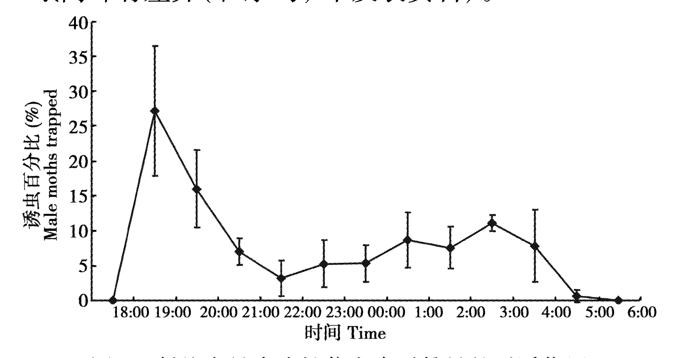


图 1 斜纹夜蛾合成性信息素对雄蛾的引诱作用及其昼夜节律的变化(宁波北仑城郊，2008 年 9 月 1 日)

Fig. 1 The diurnal activity of the male moths of tobacco cutworm *Spodoptera litura* attracted by synthetic sex pheromone lures (Beilun, Ningbo, September 1, 2008)

2.2 单个植物气味化合物与斜纹夜蛾性信息素混合的引诱作用

实验中，测试了顺 3-己烯乙酸酯、苯甲醛、苯乙醛、柏木脑、柏木烯、罗勒烯、苯甲醇、2-羟基苯甲醛、水杨酸甲酯等 9 种化合物对斜纹夜蛾的性信息素引诱作用的影响，结果表明，只有一定剂量的苯乙醛(PAA)显著提高斜纹夜蛾性信息素的引诱作用，PAA 浓度过高则可以显著抑制雄蛾对性信息素的反应(图 2：A，B)。在随后进行的两个选择试验中，一定剂量的 PAA 与性信息素化合物的混合物比单一斜纹夜蛾性信息素的引诱作用高出 45.2% ±13.5% (图 3)。

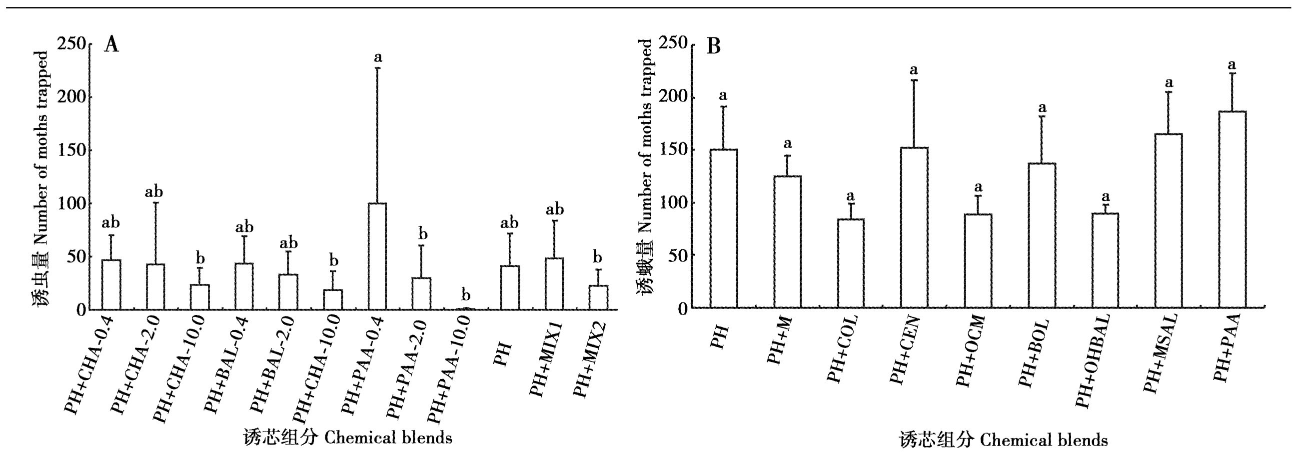


图 2　植物气味化合物与性信息素化合物的田间诱捕试验(宁波北仑梅山岛)

Fig. 2 The field tests of the mixture of plant-derived volatiles and sex pheromone (Meishan Island, Beilun, Ningbo)

A. 试验在 2008 年 9 月 9 至 10 月 27 日进行 The experiment was carried out from Sept. 9 to Oct. 27, 2008. PH: Sex pheromone of *Spodoptera litura*. PH: 斜纹夜蛾性信息素 Sex pheromone of *S. litura*; CHA: 顺 3-已烯-乙酸酯 *Cis*-3-hexen-1-ol acetate; BAL: 苯甲醛 Benzaldehyde; PAL 苯乙醛 Phenylacetaldehyde; MIX1: CHA: BAL: PAL(每个诱芯 2 mg: 0.4 mg: 2 mg) CHA: BAL: PAL(2 mg: 0.4 mg: 2 mg per lure); MIX2: CHA: BAL: PAL(每个诱芯 10 mg: 0.4 mg: 2 mg) CHA: BAL: PAL(10 mg: 0.4 mg: 2 mg per lure)。柱上不同小写字母表示差异显著(Duncan 氏多重比较, $P<0.05$)。Bars with different lowercase letters are significantly different by Duncan's multiple range test ($P<0.05$). B. 试验在 2008 年 10 月 27 至 11 月 8 日进行, 其结果在统计上没有显著差异 The experiment was carried out between Oct. 27 and Nov. 8, 2008, and the result showed no statistically significant difference. PH: 斜纹夜蛾性信息素 Sex pheromone of *S. litura*; M: 顺 3-已烯-乙酸酯、苯甲醛和苯乙醛(每个诱芯 0.4 mg) *Cis*-3-hexen-1-ol acetate, benzaldehyde and phenylacetaldehyde (0.4 mg each per lure); COL: 柏木脑 Cedrol (0.4 mg per lure); CEN: 柏木烯 Cedrene (0.4 mg per lure); OCM: 罗勒烯 Ocimene (0.4 mg per lure); BOL: 苯甲醇 Benzyl alcohol (0.4 mg per lure); OHBAL: 2-羟基苯甲醛 2-Hydroxybenzaldehyde (0.4 mg per lure); MSAL: 水杨酸甲酯 Methyl salicylate (0.4 mg per lure); PAA: 苯乙醛 phenylacetaldehyde (0.1 mg per lure).

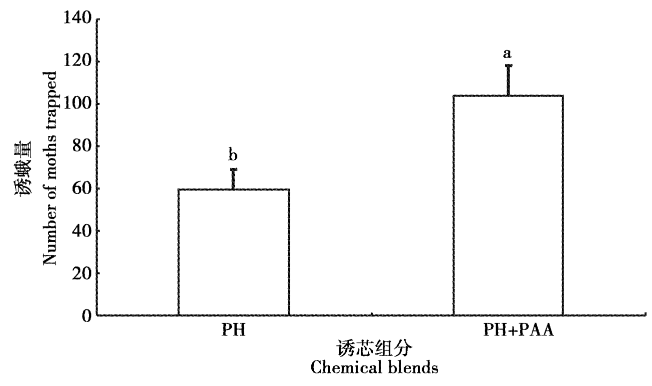


图 3　植物气味化合物苯乙醛(PAA)与性信息素化合物组成的新诱芯与原诱芯的比较试验(宁波北仑城郊, 2008 年 11 月 6 至 11 月 20 日)

Fig. 3 The comparison tests of attractiveness of new lure composed of sex pheromone compounds and plant derived volatiles (PAA) with old lure composed of only sex pheromone in the fields (Beilun, Ningbo, November 6－20, 2008)

PH: 原诱芯 Pheromone lure; PH＋PAA: 新诱芯 Mixture of pheromone and plant derived volatiles. 柱上不同小写字母表示差异显著(Ducan 氏多重比较, $P<0.05$). Bars with different lowercase letters are significantly different by Duncan's multiple range test ($P<0.05$).

然而，在另一试验中发现，如果只是单一的斜纹夜蛾性信息素化合物，如顺 9，反 11-十四碳二烯乙酸酯与苯乙醛混合，而缺少微量组分顺 9,反 12-十四碳二烯乙酸酯，不仅没有显示任何增效作用，而且还没有活性，在田间没有诱捕到雄蛾(图 4)。

2.3　多个植物气味化合物与斜纹夜蛾性信息素混合的引诱作用

试验中，我们配置了不同浓度比例的顺 3-已烯-乙酸酯、苯甲醛、苯乙醛组合而成的一些植物气味化合物的混合物，但实验中测试的各混合物组成并没有显著提高斜纹夜蛾性信息素的引诱作用(图 2：A，B)。

2.4　单个植物气味化合物对斜纹夜蛾的引诱作用

单个植物气味化合物 PAA 在 3 种不同剂量下对斜纹夜蛾的引诱作用非常小，实验中测试的 PAA 3 个浓度梯度中，增加 PAA 的剂量，并没有显著提高其引诱力(图 5)。但性信息素与 0.4 mg PAA 的混合物则显著高于性信息素的诱捕量，甚至高于性信息素的诱捕量与 PAA 诱捕量之和，因此，一定剂量的 PAA 与性信息之间起协同作用引诱斜纹夜蛾雄蛾。

此外，顺-3- 已烯-乙酸酯、苯甲醛、苯乙醛、苯甲醇、2-羟基苯甲醛、水杨酸甲酯组成的混合物对斜纹夜蛾的雄蛾也只有微弱的引诱作用，远低于合成性信息素的引诱作用(图 5)。

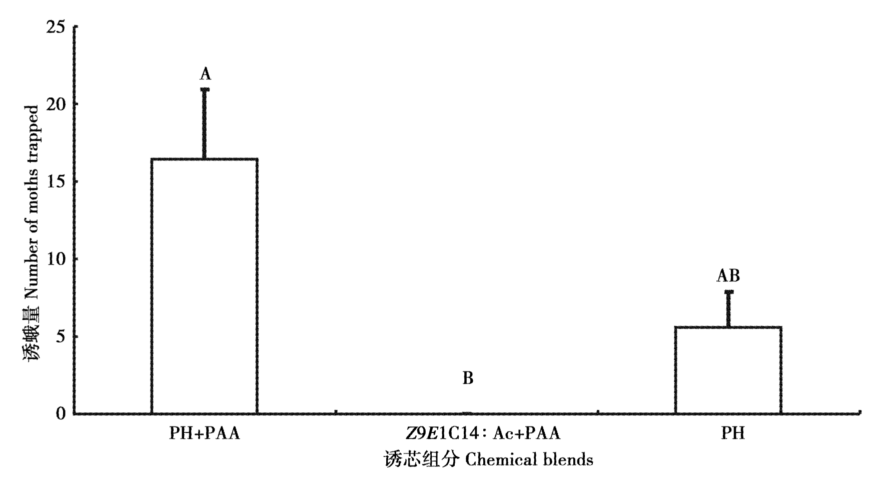


图 4 植物气味苯乙醛与单一性信息素混合对斜纹夜蛾的引诱作用(宁波北仑梅山岛, 2009 年 5 月 5 至 5 月 30 日)

Fig. 4. Field trap test of plant derived volatile phenylacetaldehyde (PAA) mixed with one of *Spodoptera litura* pheromone compounds (Meishan Island, Beilun, Ningbo, May 5 – 30, 2009)

PH: 完整斜纹夜蛾性信息素组成 Complete sex pheromones. 诱蛾量为 6 个诱捕器的平均数(± 标准误)。Number of moths trapped indicated the average of 6 traps (± *SE*).

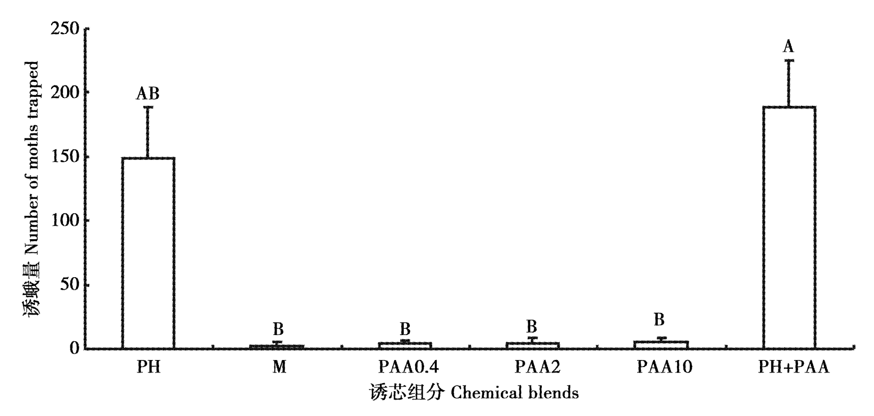


图 5 植物气味化合物苯乙醛及其混合物对斜纹夜蛾的引诱作用(宁波北仑梅山岛, 2008 年 10 月 27 至 11 月 8 日)

Fig. 5 The attractiveness of phenylacetaldehyde (PAA) and its mixture with other plant-derived volatiles in the rubber septa lures to *Spodoptera litura* moth in the fields (Meishan Island, Beilun, Ningbo, Oct. 27 – Nov. 8, 2008)

PH: 为完整斜纹夜蛾性信息素组成 Complete sex pheromone of *S. litura* in the standard PVC capillary tubing; PH + PAA: 为标准诱芯中加入了 0.4 mg的 PAA Standard lure mixed with 0.4 mg PAA in the PVC capillary tubing. PAA0.4: 每个天然橡胶诱芯 0.4 mg 苯乙醛 0.4 mg phenylacetaldehyde per lure; PAA2: 每个天然橡胶诱芯 2 mg 苯乙醛 2 mg phenylacetaldehyde per lure; PAA10: 每个天然橡胶诱芯 10 mg 苯乙醛 10 mg phenylacetaldehyde per lure. 诱蛾量为 6 个诱捕器的平均数(± 标准误) Number of moths trapped indicated the average of 6 traps (± *SE*); 混合物(M)由如下化合物组成: 顺-3- 己烯-乙酸酯(每诱芯 0.4 mg), 苯甲醛(每诱芯含量 0.1 mg), 苯乙醛(每诱芯 0.4 mg), 苯甲醇(每诱芯 0.1 mg), 2-羟基苯甲醛(每诱芯 0.1 mg), 水杨酸甲酯(每诱芯 0.1 mg); 柱上不同大写字母表示差异不显著(Duncan 氏多重比较, $P < 0.01$); 下同。The mixture M composed of *cis*-3-hexen-1-ol acetate (0.4 mg per lure), benzaldehyde (0.1 mg per lure), phenylacetaldehyde (0.4 mg per lure), benzyl alcohol (0.1 mg per lure); 2-hydroxybenzaldehyde (0.1 mg per lure); methyl salicylate (0.1 mg per lure). Bars with different capital letters are significantly different by Duncan's multiple range test ($P < 0.01$). The same below.

3 讨论

在植物-植食性昆虫-天敌三者关系中，植物气味在其中起重要作用(杜永均和严福顺，1994)。一方面，可以开发出能够直接诱捕雌雄两性成虫的引诱物，进而达到比使用性诱雄蛾更直接、更有效的防治效果或精准测报。在自然界中，一些植物会强烈地引诱雌雄两性蛾子(Cha *et al.*, 2008)。如天南星科芋艿是斜纹夜蛾的最好诱集作物，大葱强烈引诱甜菜夜蛾等害虫，苏丹草引诱二化螟产卵(吕建华和刘树生，2008)，而应用杨树枝把诱蛾更在我国农村有一段历史，不仅对棉铃虫有强烈的引诱作用，而且对许多夜蛾类的雌雄蛾都有引诱作用，有

学者已从中鉴定出一些对棉铃虫有一定引诱活性的化合物（夏邦颖，1978；原国辉等，1999；郭线茹等，2004；Li *et al*.，2005；刘宁等，2008）。

植物气味对雌雄两性成虫的引诱作用的相关研究很多。自然界中的气味源一般不是散发单一的气味分子，而是多种化合物按一定比例组成混合气味。一般认为，在多达数十种甚至上百种的某种植物的气味物质当中，只有一小部分关键化合物对昆虫的行为起决定作用（Tasin *et al*.，2007）。比如说，β-石竹烯，（反）-β-法尼烯 和（反）-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯在很多植物的挥发性气味中都存在，其混合物则对葡萄蔓蛾雌虫有强烈的引诱作用，引诱程度与植物挥发物相比没有显著区别（Tasin *et al*.，2006）。但缺失任何一种，其引诱力则明显下降。郭线茹等（2004）报道人工合成的引诱物与黑杨萎蔫叶片之间引诱作用的差异，除去剂量的因素外，还与化合物之间的比率和其他组分的缺失有关。然而，与昆虫性信息素不同，植物气味的引诱作用具有广谱性，尽管对不同虫的引诱有差异（Meagher and Landolt，2008），但可同时引诱多种害虫（Ginzel and Hanks，2005），甚至有益生物。斜纹夜蛾为杂食性，在寄主植物选择中可能并不依赖于特异性化合物。本研究测定了单一苯乙醛或加入一些气味化合物对斜纹夜蛾的引诱作用非常弱，更没有诱捕到雌蛾，显然，与自然寄主植物或花气味之间具有巨大的差异。

本研究证实了植物气味的另一方面的重要性，即植物气味物质可以提高性信息素的引诱效果。虽然至今相关的报道没有引诱雌雄两性的报道多，而且不同昆虫对植物气味和性信息素的互作关系并不一样，一些研究的结果还存在矛盾，但显然是一个重要领域（Dickens，1989；Glinwood *et al*.，1999；Ochieng *et al*.，2002；Deng *et al*.，2004；Yang *et al*.，2004）。Light 等（1993）最早注意到植物绿叶气味对美洲棉铃虫 *Helicoverpa zea* 和苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 性信息素的协同引诱作用。Deng 等（2004）报道了在田间植物源气味反 2-己烯醛、苯乙醛、顺 3-己烯乙酸酯、顺 3-己烯醇对甜菜夜蛾性信息素的显著增效作用，试验中的植物气味与性信息素是设置在不同诱芯中的。许多植物的花是昆虫的补充营养源，一些需要补充营养的蛾类昆虫在羽化后会迅速寻找植物花朵中的蜜源，为下一步的交配和产卵作准备。在自然界中花释放的气味量一般较大，从进化来说，雄性成虫会利用花的气味背景确定雌蛾的位置，可以减少雄蛾搜索雌蛾的时间，提高交配效率。因此，从寄主植物、诱虫植物或花中寻找昆虫性信息素的增效剂具有理论基础。例如，一些苹果气味中的顺 3-己烯醇、（反）-β-法尼烯、里那醇在试验室风洞测试中提高苹果蠹蛾性信息素的引诱反应（Yang *et al*.，2004）。另一项有趣的研究表明，欧洲鳃金龟 *Melolontha melolontha* 对单一的性信息素（例如 2-甲基苯醌）没有行为学的反应，但对性信息素与绿叶气味物质的混合物有强烈的趋向反应（Reinecke *et al*.，2002）。这些结果表明，植物气味物质对性信息素的增效作用取决于化合物的种类、比例。起增效作用的气味化合物往往并不是某种植物特有的挥发性物质，而是在寄主植物和非寄主植物都存在的物质。

顺 3-己烯乙酸酯是非常普遍的植物绿叶气味之一，苯甲醛、苯乙醛、苯甲醇、2-羟基苯甲醛、水杨酸甲酯也广泛存在于许多植物的花、玉米和杨树枝把等挥发性气味中。本研究测试的 9 种化合物中，只有苯乙醛在一定浓度下显著提高性信息素对斜纹夜蛾雄蛾的引诱作用。同时，本试验中配制的一些混合物并没有显著提高苯乙醛的协同作用，反而有抑制作用。这一结果印证了以上的结论，即同样的气味物质以不同的方式混合之后对行为的影响可能截然不同。同时，苯乙醛只有在比较狭窄的浓度范围起作用，显然，释放量是一个重要因子。

生测方法的差异可能影响试验的结果，例如实验室风洞生测与田间试验结果会有一定的差异。Meagher 和 Mitchell（1998）的试验表明，常见花香味之一的苯乙醛在实验室生测中提高 *S. frugiperda* 对性信息素的定向飞行和接触诱芯的比率，但在田间试验则显示了抑制作用（Meagher，2001），而且由于苯乙醛的植物气味性质，诱捕到不少天敌。另一研究也显示花的主要化合物苯乙醛和顺 3-己烯乙酸酯并没有提高棉铃虫性信息的田间诱捕量（Kvedraras *et al*.，2007）。在田间，诱捕器的设计可能也会影响诱捕结果。气味对目标昆虫的诱捕涉及到一系列不同的过程，在远距离性信息素和简单的植物气味组成可以协同引诱其向上风口飞行，但在近距离，可能需要更精确配比的气味混合物或视觉信号结合引导其进入诱捕器。一些报道增效作用十分显著的试验多采用体积较大的诱捕器，如 Texas 网笼和水盆诱捕器，是否表明目标害虫容易进入诱捕器，而昆虫接近小型诱捕器附近后，在检测释放气味的精确性后，比较早就逃逸了。不过，这需要

通过夜间摄像跟踪昆虫诱捕行为进行更深入的研究。

植物气味物质和昆虫信息素的整合在嗅觉神经生理研究中可能是一个重要的模式，相关的深层研究才刚开始。触角上存在编码不同信息素化合物的高度特异性神经元，而这些神经元对性信息素的反应可被植物气味化合物协同提高（Ochieng *et al.*，2002）。嗅觉信号在中枢神经系统中的加工位于触角叶中，已研究的昆虫包括烟草天蛾 *Manduca sexta*，烟夜蛾 *H. virescens*，灰翅夜蛾 *S. littoralis*，小地老虎 *Agrotis ipsilon* 和家蚕 *Bombyx mori* 等。触角叶神经纤维球的其中一部分用于加工植物气味或可能的其他气味信息（Namiki *et al.*，2008），而其中一些神经纤维球还选择性地处理一些特异性植物气味（Reisenman *et al.*，2005）。触角叶的另一部分由 3 个雌雄不同的神经纤维球组成，位于触角神经进入触角叶的入口处。在雄蛾中，这些特异的神经纤维球负责加工处理对性信息素的反应（Hansson *et al.*，1991）。从应用角度来说，寻找性信息素的增效剂可能是提高诱捕效率比较有效的途径，至于引诱雌雄两性的引诱物可能在较短时间内研究难度大，而且对天敌等有益生物的诱杀可能也是要评估的一个课题。此外，GC-EAD 是目前普遍采用的鉴定方法（Du *et al.*，1998；Du and Millar，1999），但是触角电位信号（EAG）受多种因素的影响，其中包括气流带来机械刺激，灵敏度也不高。如果化合物浓度太低，即使该物质具有生物活性，EAG 可能反映不出来。如芋艿叶对斜纹夜蛾的引诱作用很强，但气味浓度很低，利用 GC-EAD 就无法鉴定出完整的活性化合物（杜永均，未发表资料）。由于触角受体神经元的电信号在脑部触角叶内的神经纤维小球中被自然地放大了 100 ~ 1 000 倍（Hartlieb *et al.*，1997）。在触角叶内做记录可以提高检测植物气味物质生物活性的灵敏度。多元电生理记录与气相的联用，结合风洞试验从植物花气味中鉴定出，只要 3 个基本化合物组成的混合物就可以达到花气味一样的引诱作用，显示了研究植物气味嗅觉调控机制的极大潜力和应用前景（Riffell *et al.*，2009）。为此，我们下一步正在开展的工作是采用气相色谱与脑部多元电极电生理记录结合，从诱蛾植物中筛选活性化合物以及其最佳的浓度配比。

参 考 文 献（References）

Cha DH, Nojima S, Hesler SP, Zhang A, Linn CE, Roelofs WL, Loeb GM, 2008. Identification and field evaluation of grape shoot volatiles attractive to female grape berry moth (*Paralobesia viteana*). *J. Chem. Ecol.*, 34: 1 180 – 1 189.

Deng JY, Wei HY, Huang YP, Du JW, 2004. Enhancement of attraction to sex pheromones of *Spodoptera exigua* by volatile compounds produced by host plants. *J. Chem. Ecol.*, 30: 2 037 – 2 045.

Dickens JC, 1989. Green leaf volatiles enhance aggregation pheromone of boll-weevil, *Anthonomus grandis*. *Entomol. Exp. Appl.*, 52: 191 – 203.

Du YJ, Millar JG, 1999. Electroantennogram and oviposition bioassay responses of *Culex quinquefasciatus* and *Culex tarsalis* (Diptera: Culicidae) to chemicals in odors from Bermuda grass infusions. *J. Med. Entomol.*, 36(2): 158 – 166.

Du YJ, Poppy GM, Pickett JA, Powell W, Wadhams LJ, Woodcock CM, 1998. Identification of semiochemicals released during aphid feeding that attract parasitoid *Aphidius ervi*. *J. Chem. Ecol.*, 24(8): 1 355 – 1 368.

Du YJ, Yan FS, 1994. The role of plant volatiles in tritrophic interactions among phytophagous insects, their host plants and natural enemies. *Acta Entomologica Sinica*, 37(2): 233 – 250. [杜永均，严福顺，1994. 植物挥发性次生物质在植食性昆虫、寄主植物和昆虫天敌关系中的作用机理. 昆虫学报，37（2）：233 – 250]

Ginzel MD, Hanks LM, 2005. Role of host plant volatiles in mate location for three species of longhorned beetles. *J. Chem. Ecol.*, 31: 213 – 217.

Glinwood RT, Du YJ, Smiley DWM, Powell W, 1999. Comparative responses of parasitoids to synthetic and plant-extracted nepetalactone component of aphid sex pheromones. *J. Chem. Ecol.*, 25(7): 1 481 – 1 488.

Guo XR, Yuan GH, Li WZ, Jiang JW, Ma JS, 2004. Studies on the attraction to moths of volatile constituents of withered black poplar leaves. *J. Henan Agric. Univ.*, 38(3): 255 – 258. [郭线茹，原国辉，李为争，蒋金炜，马继盛，2004. 黑杨萎蔫叶片挥发性物质诱集蛾类成虫的研究. 河南农业大学学报，38（3）：255 – 258].

Hansson BS, Christensen TA, Hildebrand JG, 1991. Functionally distinct subdivisions of the macroglomerular complex in the antennal lobe of the male sphinx moth *Manduca sexta*. *J. Comp. Neurol.*, 312: 264 – 278.

Hartlieb E, Anton S, Hansson BS, 1997. Dose-dependent response characteristics of antennal lobe neurons in the male moth *Agrotis segetum* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Comp. Physiol. A*, 181: 469 – 476.

Kvedaras OL, Del Socorro AP, Gregg PC, 2007. Effects of phenylacetaldehyde and (*Z*)-3-hexenyl acetate on male response to synthetic sex pheromone in *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Australian J. Entomol.*, 46(3): 224 – 230

Li WZ, Yuan GH, Sheng CF, Guo XR, 2005. Active compounds in *Populus nigra* L. wilted leaves responsible for attracting *Helicoverpa*

armigera (Hübner) (Lep., Noctuidae) and new agaropectin formulation. J. Appl. Entomol., 129: 557 – 562

Light DM, Flath RA, Buttery RG, Zalom FG, Rice RE, Dickens JC, Jang EB, 1993. Host-plant green-leaf volatiles synergise the synthetic sex pheromones of the corn earworm and codling moth (Lepidoptera). *Chemoecology*, 4: 145 – 152.

Lin DY, Zhang SZ, Block E, Katz LC, 2005. Encoding social signals in the mouse main olfactory bulb. *Nature*, 434: 470 – 477.

Liu N, Liu XN, Li N, Bian Y, 2008. Advances on research on the mechanisms of using poplar twig bundles for trapping *Helicoverpa armigera*. *China Plant Protection*, 28(5): 19 – 23. [刘宁, 刘小宁, 李娜, 边洋, 2008. 杨树枝把诱集棉铃虫作用与机理研究进展. 中国植保导刊, 28(5): 19 – 23]

Lü JH, Liu SS, 2008. Advances in application of trap cropping to IPM. *Plant Protection*, 34(2): 1 – 6. [吕建华, 刘树生, 2008. 诱虫作物在害虫治理中的应用. 植物保护, 34(2): 1 – 6]

Meagher RLJr, 2001. Trapping fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) adults in traps baited with pheromone and a synthetic floral volatile compound. *The Florida Entomologist*, 84(2): 288 – 292

Meagher RL, Landolt PJ, 2008. Attractiveness of binary blends of floral odorant compounds to moths in Florida, USA. *Entomol. Exp. Appl.*, 128: 323 – 329.

Meagher RL, Mitchell ER, 1998. Phenylacetaldehyde enhances upwind flight of male fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to its sex pheromone. *Florida Entomologist*, 81(4): 556 – 559.

Namiki S, Iwabuchi S, Kanzaki R, 2008. Representation of a mixture of pheromone and host plant odor by antennal lobe projection neurons of the silkmoth *Bombyx mori*. *J. Comp. Physiol. A*, 194: 501 – 515.

Ochieng SA, Park KC, Baker TC, 2002. Host plant volatiles synergize responses of sex pheromone-specific olfactory receptors neurons in male *Helicoverpa zea*. *J. Comp. Physiol. A*, 188: 325 – 333.

Ouyang SC, Chu YI, 1990. Biology of the tobacco cutworm (*Spodoptera litura* (F.) Ⅱ. Longevity and mating ability of adults. *Chinese J. Entomol.*, 10: 27 – 36. [欧阳盛芝, 朱耀沂, 1990. 斜纹夜蛾(*Spodoptera litura* (F.))生物学 II. 成虫寿命及交尾能力. 中华昆虫, 10: 27 – 36]

Reinecke A, Ruther J, Hilker M, 2002. The scent of food and defence: Green leaf volatiles and toluquinone as sex attractant mediate mate finding in the European cockchafer *Melolontha melolontha*. *Ecology Letters*, 5: 257 – 263.

Reisenman CE, Christensen TA, Hildebrand JG, 2005. Chemosensory selectivity of output neurons innervating an identified, sexually isomorphic olfactory glomerulus. *J. Neurosci.*, 25(35): 8 017 – 8 026.

Riffell JA, Lei H, Christensen TA, Hildebrand JG, 2009. Characterization and coding of behaviorally significant odor mixtures. *Current Biology*, 19(4): 335 – 340.

Tasin M, Backman AC, Bengtsson M, Varela N, Ioriatti C, Witzgall P, 2006. Wind tunnel attraction of grapevine moth females, *Lobesia botrana*, to natural and artificial grape odour. *Chemoecol.*, 16: 87 – 92.

Tasin M, Backman AC, Coracini M, Casado D, Ioriatti C, Witzgall P, 2007. Synergism and redundancy in a plant volatile blend attracting grapevine moth females. *Phytochemistry*, 68: 203 – 209.

Xia BY, 1978. Observation and analysis on the attractiveness of poplar branch to moth. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 11: 29. [夏邦颖, 1978. 杨树枝把诱蛾原因的观察与分析. 农业科技通讯, 11: 29]

Yang ZH, Bengtsson M, Witzgall P, 2004. Host plant volatiles synergize response to sex pheromone in codling moth, *Cydia pomonella*. *J. Chem. Ecol.*, 30: 619 – 629.

Yuan GH, Zheng QW, Ma JS, Cao ZL, Luo MH, Yin XM, 1999. Research on spectrum and mechanism of attracting insects with poplar branch. *Acta Agric. Univ. Henan*, 33(2):147 – 150. [原国辉, 郑启伟, 马继盛, 曹宗亮, 罗梅浩, 尹新明, 1999. 杨树枝把诱虫谱及诱虫机理的初步研究. 河南农业大学学报, 33(2): 147 – 150]

(责任编辑:赵利辉)